



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Maria Kukkonen

SELVITYS MAKEIDEN RAAKAVESIEN
PUHDISTAMISESTA TALOUSVEDEKSI
JA HÖYRYVOIMALAITOSKÄYTTÖÖN
AFRIKASSA

Ghana, Namibia ja Kenia

Tekniikka
2017

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Maria Kukkonen
Opinnäytetyön nimi	Selvitys makeiden raakavesien puhdistamisesta talousvedeksi ja höyryvoimalaitoskäyttöön Afrikassa
Vuosi	2017
Kieli	suomi
Sivumäärä	48
Ohjaaja	Pekka Sten

Tämä työ tehtiin toimeksiantona Prohoc Oy:lle. Työn tarkoituksena oli selvittää Afrikan maiden vesitilannetta sekä esittää erilaisia puhdistustekniikoita pinta- ja pohjavesille. Puhdistettavasta vedestä oli tarkoitus saada lopputuotteena talousveden lisäksi vettä höyryturbiinivoimalaitoksen eri prosessien osiin.

Afrikka on jo pitkään kärsinyt puhtaan veden puutteesta. Talousvesi pitää sisällään juomaveden sekä kotitalouden ruoanlaittoon käytettävän veden. Tämän työn maantieteellisenä rajauksena ovat Ghana, Namibia ja Kenia. Veden laadun standardina käytetään Maailman terveysjärjestön WHO:n (World Health Organization) asettamia arvoja.

Työssä käsiteltiin pääasiassa teknisiä vedenpuhdistusratkaisuja, sillä Prohoc Oy:n käyttötarkoitukseen biologiset puhdistustavat koettiin liian vaativina ylläpitää. Puhdistusprosessi keskittyy erilaisiin kalvotekniikoihin.

ABSTRACT

Author	Maria Kukkonen
Title	Research of Purifying Freshwaters into Drinking Water and Steam Power Plant Usage in Africa
Year	2017
Language	Finnish
Pages	48
Name of Supervisor	Pekka Stèn

This research was done at the request of Prohoc Oy. The purpose of this research was to examine the water situation in Africa and to suggest different purification options for surface water and groundwater. Water is purified to be used as drinking water, and as process water for steam turbine power plant.

Africa has suffered from lack of clean water for ages. This research was limited to include only Ghana, Namibia and Kenya. Water quality standards have been based on the criteria given by World Health Organization WHO.

The research was based on technical solutions, as biological purification methods were perceived to be too demanding from Prohoc's point of view. Purification process concentrates on different membrane techniques.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	7
2	GHANA.....	9
2.1	Vesihuollon ja -jakelun nykytila.....	9
2.2	Vedenlähteet	10
2.2.1	Pintavedet.....	10
2.2.2	Pohjavedet.....	11
2.2.3	Suurimmat vedenlähteiden ongelmat.....	11
3	NAMIBIA.....	14
3.1	Vesihuollon ja -jakelun nykytila.....	14
3.2	Vedenlähteet	15
3.2.1	Pintavedet.....	15
3.2.2	Pohjavesi	15
3.2.3	Suurimmat vedenlähteiden ongelmat.....	16
3.2.4	Windhoek.....	17
4	KENIA.....	20
4.1	Vesihuollon ja -jakelun nykytila.....	20
4.2	Vedenlähteet	21
4.2.1	Pintavedet.....	21
4.2.2	Pohjavesi	22
4.2.3	Suurimmat vedenlähteiden ongelmat.....	22
5	VEDENOMINAISUUDET	23
5.1	WHO:n asettamat standardit talousvedelle.....	23
5.2	Vedessä esiintyvät epäpuhtaudet	26
5.3	Vedentarve	29
6	HÖYRYTURBIINIVOIMALAITOSTEKNIikka JA –VEDET.....	30
6.1	Höyryturbiinivoimalaitoksen veden ominaisuudet	31
7	VEDENPUHDISTAMINEN.....	35

7.1	Vedenpuhdistuksen vaiheet	35
7.2	Tulevaisuuden vedenpuhdistustekniikat	38
7.2.1	Elektrokoagulointi.....	38
7.2.2	Biopolymeeripohjaiset vedenpuhdistusmateriaalit	39
7.2.3	Nanoteknologia	39
7.2.4	Biomimeettiset kalvot	40
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	41
	LÄHTEET.....	44

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Ghanan sijainti Afrikassa	9
Kuva 2. Ghanan hydrologinen kartta	11
Kuva 3. Namibian sijainti Afrikassa	14
Kuva 4. Namibian hydrogeologinen kartta.	16
Kuva 5. Havaintokuva University of Cape Town -puhdistusprosessista	18
Kuva 6. Kenian sijainti Afrikassa.....	20
Kuva 7. Kenian pintavedet	21
Kuva 8. Esimerkki höyryturbiinivoimalaitoksen prosessikaaviosta	30
Taulukko 1. WHO:n asettamia kemiallisia enimmäispitoisuuksia talousvedelle	24
Taulukko 2. Vedenpuhdistuksen ongelmia ja niille sopivat puhdistustekniikat..	26
Taulukko 3. Syöttöveden laatuvaatimukset	33
Taulukko 4. Kattilaveden laatuvaatimuksia	34

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä selvitetään Prohoc Oy:n toimeksi antamana vedenpuhdistusta Afrikassa. Prohoc Oy on 1996 perustettu monialainen yritys, jolla on Vaasan lisäksi toimipisteet Tampereella ja Helsingissä, mutta toimintaa maailmanlaajuisesti. Prohoc tarjoaa projektikohtaisia yritystoiminnan konsultointi-, suunnittelu- ja dokumentaatiopalveluita projektin koko elinkaaren ajan useilta tekniikan eri aloilta.

Vesi on elinehto jokaiselle toiminnalle. Maailman vesivaroista 97 % sijaitsee merissä, napajäätiköt kattavat 2 % ja vain 1 % vesistä on ilmakehässä, pohjavesissä, pintavesissä sekä maaperässä. Ihmisen toiminnan ja väestönkasvun vuoksi puhtaan veden riittävyydestä on tullut monilla alueilla ongelma. Jopa 1,8 miljardia maailman väestöstä kärsii turvallisen, puhtaan veden puutteesta. Ongelma koskee kehitysmaiden lisäksi myös joitakin rikkaita maita. (Water facts 2017)

Syy siihen, miksi juuri Afrikka on kärsinyt vesipulasta niin kauan, on väestönkasvun, ilmaston ja kulttuurin yhteissumma. Vettä on käytetty nopeammin kuin se on uusiutunut. Afrikan osissa, joissa kärsitään kuivuudesta, ei ole sadekausina osattu varastoida vettä kuivien kausien varalle. Kuumassa ilmastossa kasteluun on käytetty paljon vettä. Luonnonvaroja ei ole ennen tiedon karttumista suojeltu tarpeeksi hyvin. Koska veden riittävyys on edellytys kaikenlaiselle tuotannolle, Afrikan maat ovat köyhtyneet kuivien kausien aiheuttaman veden puutteen takia. Tämän vuoksi myöskään vesiteknologian kehittämiseen ei ole ollut varaa. Vesikriisiin on päädytty näin monen toisiaan seuraavan tapahtuman kautta, koska tilanteeseen on havahduttu liian myöhään.

Afrikka on valittu selvityksen kohteeksi juuri vesikriisinsä vuoksi, sillä monissa sen maista on aito tarve puhtaalle vedelle. Afrikka on kuitenkin alueena hyvin laaja ja siellä on niin kehitykseltään kuin geologialtaan hyvin paljon eroavaisuuksia maiden välillä, joten työ rajataan koskemaan Ghanan, Namibian ja Kenian vesihuollon tilaa ja sitä, minkälaisia potentiaalisia ratkaisuja vedenpuhdistukselle ky-

seisissä maissa on. Ghana, Namibia ja Kenia on valittu niiden maantieteellisten sijaintien vuoksi, näin saadaan tietoa Afrikan eri osista. Toinen syy kyseisiin maihin päätymiseen on se, että kaikissa kyseisissä maissa on virallisena kielenä englanti. Lisäksi maiden puhtaan veden tarve on suuri, toisin kuin esimerkiksi Marokon, jossa turistimaana on hyvä tilanne veden suhteen. Tärkeänä kriteerinä rajauksessa toimi myös se, että kyseisten maiden tilanne on suhteellisen rauhallinen, joten konkreettisen toiminnan aloittaminen maissa ei esty esimerkiksi sisällissodan vuoksi.

Opinnäytetyössä keskitytään makeiden raakavesien käsittelyyn. Tässä työssä esitetään puhdistustapoja järvi- ja jokivesille sekä pohjavedelle. Vettä on tarkoitus puhdistaa talousvedeksi sekä höyryturbiinivoimalaitoskäyttöön.

2 GHANA

Ghana sijaitsee Länsi-Afrikassa päiväntasaajan pohjoispuolella, sijainti näkyy kuvassa 1. Ghanassa on vajaa 27 miljoonaa asukasta ja vuonna 1957 itsenäistyneellä maalla on pinta-alaa 238 535 km² ja Ghana onkin yksi tiheimmin asutuista Länsi-Afrikan maista. Rannikkoa Ghanalla on 500 kilometriä. Ghanassa on niin sademetsäalueita, metsäistä vuoristoa kuin savannia. Kaskenpolton ja liikaviljelyn vuoksi aavikoituminen on todellinen uhka Ghanassa. Ghanan luonnonvaroja ovat kulta ja hopea, puu, timantit, bauksiitti, mangaani, kala, kumi, vesivoima, raakaöljy, suola ja kalkkikivi. (Ghana N.d; Globalis 2015; The World Factbook 2017)



Kuva 1. Ghanan sijainti Afrikassa (Location map of Ghana 2017).

2.1 Vesihuollon ja -jakelun nykytila

Ghanan väestöstä noin 80 % asuu alueella, jonka juomavesi voidaan määrittää turvalliseksi. Vedensaanti on kuitenkin hyvin aluekohtaista, ja esimerkiksi Ghanan pohjoisosassa kolmasosa väestöstä on ilman puhdasta juomavettä. Kokonaisuudessaan turvallisen talousveden puutteesta kärsii 3 miljoonaa ghanalaista. Tä-

män lisäksi edes kaikilla vesijohtoverkoston kuuluvilla talouksilla ei ole välttämättä vedensantimahdollisuutta ympäri vuorokauden, sillä veden riittävyydeksi mahdollisimman monelle, sen jakelua säännöstellään alueellisesti. Tällöin taloudella saattaa olla mahdollisuus puhtaaseen veteen vain osan aikaa vuorokaudesta. (Ghana 2012; Ghana 2017; Looking 2013)

2.2 Vedenlähteet

2.2.1 Pintavedet

Ghanan vedenlähteiden määrä on erinomainen. Kuvassa 2 nähdään Ghanan hydrologinen kartta. Joet ja niiden muodostamat vesialtaat kattavat koko maan. Volta ja sen pienempien jokien, Otin, Dakan, Prun, Senen ja Aframin, vesialtaat kattavat 80 % koko maan pinta-alasta. Alueelta löytyy myös maailman suurin keinotekoinen järvi Volta. Bia-, Tano-, Ankobra- ja Pra-jokien muodostelma kattaa 22 % Ghanan pinta-alasta. Rannikon valuma-alue, joka koostuu Ochi-Nawuka-, Ochi-Amissah-, Ayensu-, Densu- ja Tordzie-joista, kattaa loput 8 %. (The World factbook 2017; Water for life 2010)

Puhtaan veden jakelussa ongelmaksi muodostuvat mm. laittomat kytkökset sekä ikääntynyt vesiverkosto. Merkittävä määrä puhdasta vettä menee hukkaan putkien vuotaessa tai hajotessa. (Urban water supply 2007)

Ghanan luonto ja sen myötä vesistöt ovat alttiita myös lääkepäästöille. Ghanan laissa ei ole tarpeeksi kattavia säädöksiä lääkkeiden tuhoamisesta, ja esimerkiksi virallisia paikkoja käyttämättömien tai vanhentuneiden lääkkeiden palauttamiselle ei juurikaan ole yksityisten ihmisten tavoitettavissa. Jopa lainmukaisessa yritysten lääkkeiden hävittämisessä lääkkeet yleensä poltetaan tai kaadetaan suoraan kunnalliseen viemäriin erottelematta. Tämän vuoksi lääkkeitä päätyy vesistöihin, eikä tämän hävitystavan pitkäaikaisia vaikutuksia ole tutkittu ollenkaan. (Ahorsu & Esseku 2017)

Ghanan pohjavesien ja pintavesien pitoisuuksia on tutkittu paljon. Vesien puhtausaste ja vesissä esiintyvät haitat ovat hyvin aluekohtaisia. Suurimmassa osassa kaivoista, joiden veteen turvaudutaan etenkin Ghanan vähemmän asutuissa Pohjoisosissa, löytyy suuria määriä erilaisia bakteereita, jotka eivät täytä esimerkiksi WHO:n (World Health Organization) standardeja juomavedelle. Pohjavesi on suurilta osin hieman hapanta, mutta muutoin yllättävän hyvälaatuista, joissakin osissa Ghanaa se kävisi juomavedeksi sellaisenaan. Kaivostoiminnan haitat näkyvät tutkitusti kaivostoimintojen läheisyyksistä otetuissa näytteissä. Erilaisia WHO:n aineille asettamia suosituksia rikotaan merkittävästi muun muassa arseenin, mangaanin, lyijyn, kadmiumin ja erityisesti elohopean osalta. Metallien määrät vaihtelevat alueittain, mutta on kiistatonta sanoa, että syy erilaisiin metalleihin vesistöissä on kaivostoiminta. (Egbi, Akiti, Osae, Dampare, Abass, & Adomako, 2013; Gampson, Nartey, Golow, & Akiti, 2013; Tekpor, Akrong, Asmah, Banu, & Ansa 2015)

Kolibakteeria (*Escherichia coli*) esiintyy ihmisen ruoansulatusjärjestelmässä. Siksi sen esiintyminen vesitestissä kertoo yleensä siitä, että vesi on saastunut ulosteella. Tämän vuoksi WHO:n ohjearvojen mukaan tätä bakteerilajia ei saisi vesinäytteissä esiintyä ollenkaan. Kaikissa vesistä tehdyissä tutkimuksissa ei mainittu koli-

bakteerin mittauksia ollenkaan, näin ollen kaikissa mittauksissa sitä ei todennäköisesti ole tutkittu. Ne tulokset joissa bakteeria tutkittiin, kolibakteeriesiintymiä löytyi. Tähän on syynä jo aiemmin tässä kappaleessa mainittu saniteettitilojen puute ja kaivojen huono suojaaminen. (Guidelines for drinking water quality 2017)

3 NAMIBIA

Namibia sijaitsee Etelä-Afrikassa (kuva 3). Sen pinta-ala on 824 292 km², ja itsenäistyminen tapahtui 1990. Asukkaita maassa on alle 2,5 miljoonaa. Pieni väestötiheys selittyy osittain maantieteellisillä syillä, sillä yli kolmasosa maan pinta-alasta on aavikkoa, ja aavikoituminen onkin yksi suurimmista Namibian ympäristöongelmista puhtaan juomaveden puutteen ohella. Namibian luonnonvaroja ovat muun muassa timantit, kupari, uraani, kulta ja hopea, lyijy ja tina, litium, kadmium, sinkki, suola sekä kala. (Globalis 2015; The World factbook 2017)



Kuva 3. Namibian sijainti Afrikassa (Location map of Namibia 2017).

3.1 Vesihuollon ja -jakelun nykytila

Vaikka vedenjakelu toimii hyvin (yli 90 % koko väestöstä on pääsy puhtaaseen vedenlähteeseen), Namibian veden riittävyys on silti vaikeuksissa kuivuuden vuoksi. Kuivuuden vuoksi sekä pintavesi- että pohjavesilähteiden raakaveden määrät ovat laskeneet merkittävästi. Namibia on vedensaannissa hyvin riippuvainen naapurimaista, sillä arviolta kolmasosa Namibian käyttövedestä tulee naapurimaista virtaavista joista. Lisäksi taloudellinen tilanne vaikuttaa Namibian vesiin huoltoon: vaikka Namibia on suhteellisen rikas maa, sen tuloerot ovat erittäin suu-

ret, jonka vuoksi suuri osa väestöstä elää köyhyysrajan alapuolella. Tämä aiheuttaa sen, ettei suurella osalla asukkaista ole varaa maksaa vedenjakelusta maan vesilaitos NamWaterille. Näin ollen NamWaterilla ei ole varaa kehittää vedensantia tai -jakelua. (Berwick 2016; Globalis 2015; Namibia 2005; Namibia 2017)

Kuivuus on suuri hättatekijä myös Namibian maataloudessa sekä muussa tuotannossa ja kuivuuden kautta tapahtuva yleinen talouden lasku lisää köyhyyttä entistään. Valtio on jo varautunut vedenjakelun säännöstelyyn, sillä jaettavaa vettä ei yksinkertaisesti ole tarpeeksi. (Berwick 2016)

3.2 Vedenlähteet

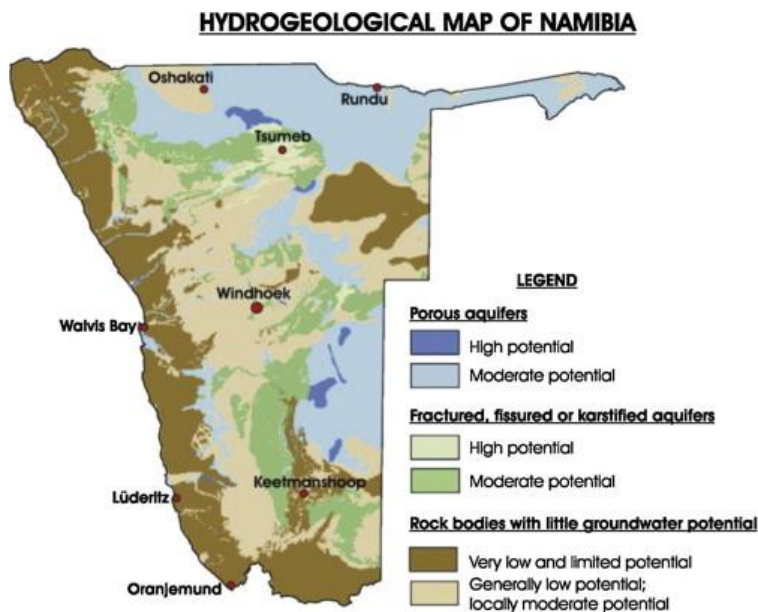
3.2.1 Pintavedet

Namibiassa on useita jokia. Namibian vähäisten sateiden ja kuumasta ilmasta johtuvan haihtumisen vuoksi monet joet ovat kuitenkin vain kausittaisia ja lähtövesityyppisiä, mikä tarkoittaa, että sen sijaan että pohjavesialueet ylläpitäisivät jokien virtaamaa, joet ruokkivat virta-aikoinaan pohjavesialueita. Kausittaiset joet ovat suurilta osin raskaasti padottuja. Ympäri vuotisia jokiäkin on. Kunene-, Okavango-, Cuando- ja Zambezi-joet virtaavat Pohjois-Namibiassa, mutta ne tulevat maahan Angolan puolelta, joten vesi ei ole yksistään Namibian käytössä. Etelä-Namibiassa virtaa puolestaan Lesothosta alkunsa saava Orange-joki. (Namibia 2005)

3.2.2 Pohjavesi

Namibian pohjavesivarannot vaihtelevat alueittain niin määrältään kuin laadultaan. Potentiaaaliltaan parhaimmat pohjavesivarannot ovat alueilla, joilla virtaa myös jokia ympäri vuoden. Kuitenkin myös sisämaasta löytyy pohjavesialueita, ja joillakin alueilla pohjavesi on ainoa asukkaiden vedenlähde. Tälläkin hetkellä Namibiassa on käytössä noin 50 000 porausreikää pohjaveden ottoon. Namibian hydrologisesta kartasta (kuva 4) nähdään, kuinka epätasaisesti pohjavesivarannot

ovat jakautuneet. Toisaalta kartta kertoo myös mahdollisuuksista. (Hamutoko, Mapani, Ellmies, Bittner & Kuells 2014)



Kuva 4. Namibian hydrogeologinen kartta (Hamutoko, Mapani, Ellmies, Bittner & Kuells 2014).

3.2.3 Suurimmat vedenlähteiden ongelmat

Yksi suurimmista ongelmista veden suhteen on sen saatavuus. Pintavesien riittävyys on epävarmaa vähäisten sateiden vuoksi, ja muista maista Namibiaan laskevien jokien patoaminen naapurivaltioissa rajoittaa vesimäärää Namibian puolella. Sadekausina varastoitavien pintavesien säilyttämisessä, kuten kausittaisten jokien patokomplekseissa, ongelmaksi muodostuu kuumasta ilmastosta johtuva veden haihtuminen. Pintavedet ovat myös epäpuhtauksien vuoksi hyvin sameita. (Namibia 2005)

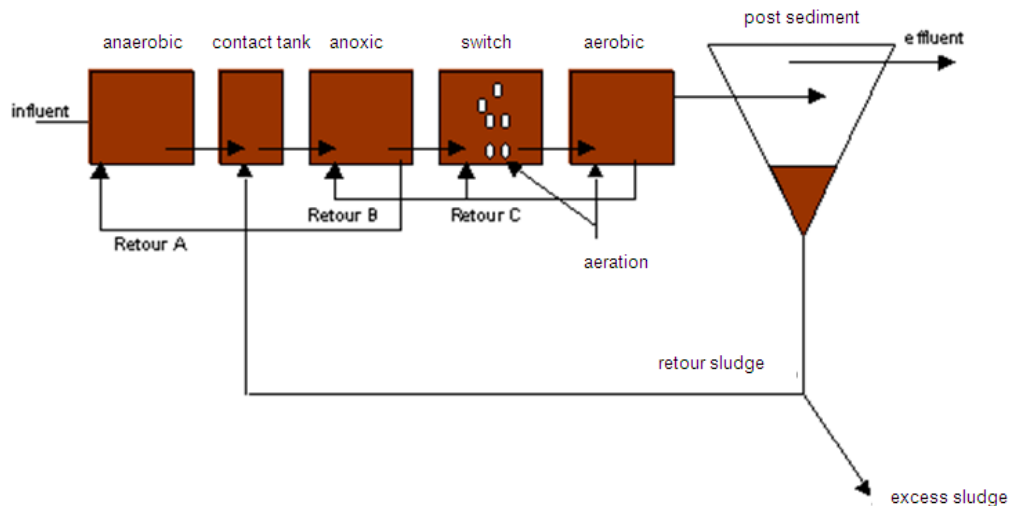
Porattu pohjavesikään ei ole ongelmatonta. Sen lisäksi että alueesta riippuen saatavilla oleva vedenmäärä vaihtelee, pohjavesien laadussa on alueellisia eroja.

Osassa pohjavettä on suuri suolapitoisuus, vedenpinnankorkeus vaihtelee ja välillä pohjavesi on hyvinkin syvällä vaatien pitkiä porausmatkoja. Joissakin tapauksissa saastunut maa on saastuttanut pohjavedenkin. Esimerkiksi kaivostoiminta alueilla on saattanut johtaa pohjavedessä mm. uraanin löytymiseen. Lisäksi pohjavesivarastojen uusiutuminen on heikkojen sateiden ja padottujen jokien vuoksi hyvin hidasta tai jopa olematonta, ja pohjavesivarastosta saatetaan pumpata liikaa vettä sen uusiutumiskykyyn nähden. Kaikkea pumpattua pohjavettä ei saada edes käyttöön asti vuotavien vesiputkien vuoksi. (Abiye & Shaduka 2016; Namibia 2015)

3.2.4 Windhoek

Windhoek on Namibian pääkaupunki. Namibian vähäisen vedensaannin vuoksi Windhoekiin rakennettiin jo vuonna 1969 vedenpuhdistuslaitos, joka puhdisti suoraan jätevedestä talousvettä. Nykyään sen aikaisella puhdistustavalla ei voitaisi tuottaa talousvedeksi kelpaavaa vettä, joten uusi nykyaikainen laitos rakennettiin vuonna 2002. Vanhaa laitosta uudistettiin sen verran, että nykyään sen tuottamaa vettä käytetään mm. puistojen sekä urheilu- ja golfkenttien kasteluun. Vuonna 2002 valmistuneen laitoksen kapasiteetti on 21000 m³ vettä päivässä. Puhdistettava vesi on kotitalouksista tulevaa jätevettä, teollisuusvedet ohjataan muualle. (Binnie & Kimber 2013; Windhoek)

Windhoekin vedenpuhdistamon toiminnasta huolehtii WABAG Group. Yhtiöllä on vesihuoltotoimintaa ympäri maailmaa. Ennen kuin kotitalousvesi ajetaan puhdistamon prosessiin, se esikäsitellään poistamalla ravinteita (kuten typpeä ja fosforia) UCT-prosessilla (University of Cape Town -prosessi, kuva 5) ja viemällä vesi kypsytykseltään läpi ennen pääasiallisen prosessin alkua. (Biological nutrient removal 2010; Winhoek)



Kuva 5. Havaintokuva University of Cape Town -puhdistusprosessista. (Biological nutrient removal 2010)

Pääasiallinen prosessi alkaa hapettamisella ja otsonoinnilla. Otsonoinnissa jäteveetteen lisätään otsonia orgaanisten aineiden hapettamiseksi. Tämän jälkeen annostellaan aktiivihiielijauhetta, jotta voidaan siirtyä koagulaatioon ja flokkaukseen. Seuraava vaihe on paineflotaatio partikkelien erottamiseksi. Paineflotaatio tarkoittaa sitä, kun flokki ja veteen syötetty ilma muodostavat yhdessä vettä kevyemmän kelluvan partikkelin, joka voidaan poistaa altaan pinnalta joko kaapimalla tai ylijuoksuttamalla. (Suhonen 2017; Windhoek)

Seuraavaksi prosessissa on vuorossa kaksikerrossuodatus (dual-media filtration). Siinä vesi kulkee ensin antrasiittihiilikerroksen läpi jatkaen matkaa hiekkakerroksen läpi. Sitten vuorossa on pääotsonointi, jonka jälkeen tehdään biologinen aktiivihiiლისuodatus (BAC) sekä rakeinen aktiivihiiლისuodatus (GAC). Lopussa suoritetaan vielä ultrasuodatus kalvotekniikalla ennen klooridesinfioinnilla ja pH-stabilisoinnilla viimeistelyä. (Binnie & Kimber 2013; Windhoek)

Ennen kuin puhdistettu vesi palautetaan kuluttajille vesijohtoverkostossa, se sekoitetaan puhdistettuun luonnonveteen. Seoksesta noin kolmasosa on puhdistettua jätevettä. Suomalaisen vesiasiantuntijan Timo Kosken mukaan tämä olisi kuitenkin tarpeetonta, sillä hänen mukaansa Windhoekin puhdistusprosessin jälkeen jä-

tevesi on puhtaampaa, mitä Suomessa hanasta tuleva vesi. (Binnie & Kimber 2013; Runsten 2013; Windhoek)

Windhoekin vedenpuhdistuslaitos on erityinen, sillä suuressa osassa maailmaa jäteveden puhdistaminen juomavedeksi on pelkästään ajatuksena ihmisille niin vieras ja vastenmielinen, että laitosten laajempi leviäminen on jäänyt toistaiseksi toteutumatta. Jätevettä kierrätetään talousvedeksi Windhoekin lisäksi esimerkiksi Singaporessa, jossa käytetty vesi puhdistetaan käyttämällä edistynyttä kalvotekniikkaa sekä UV-desinfiointia. Muualla kierrätettyä jätevettä käytetään lähinnä kasteluun. Windhoekin vedenpuhdistuslaitos tehtiin todelliseen tarpeeseen ja onkin vain ajankysymys, milloin jätevettä hyödyntävät vedenpuhdistamot leviävät muualle maailmaan pakon edessä. (Newater 2017; Windhoek)

4 KENIA

Pinta-alaltaan 580 367 km² kokoinen Kenia sijaitsee Afrikassa itärannikolla (kuva 6). Maa itsenäistyi vuonna 1963. Asukasluku on lähteestä riippuen 48 miljoonan molemmilla puolilla. Virallisia kieliä ovat swahili ja englanti. Ilmasto vaihtelee rannikon trooppisesta ilmastosta sisämaan erittäin kuivaan ilmastoon. Maata uhkaavat jaksolliset ja toistuvat kuivuudet sekä sadeaikoina mahdolliset tulvat. Kenian luonnonvarat koostuvat mm. kalkkikivestä, suolasta ja soodasta, kipsistä, piimaasta, jalokivistä, luonnosta sekä vesivoimasta. Salametsästyksen ja metsien häviämisen lisäksi suurin ympäristöuhka Keniassa on vedensaastuminen kaupunki- ja teollisuusjätteiden vuoksi. Lannoitteiden ja tuholaismyrkkyjen lisääntynyt käyttö on lisäksi heikentänyt vedenlaatua. (The World Factbook 2017)



Kuva 6. Kenian sijainti Afrikassa (Location map of Kenya 2017).

4.1 Vesihuollon ja -jakelun nykytila

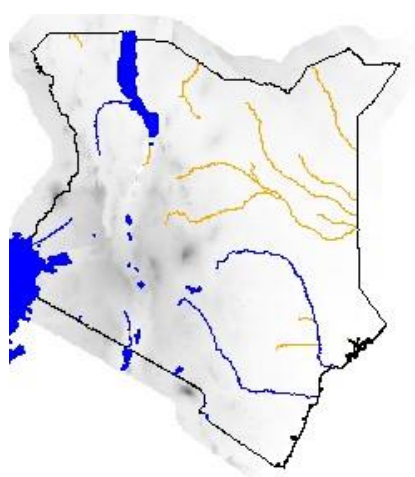
Vaikka kenialaisten vedensaanti on parantunut huomattavasti vesilain (The Water Act no. 8 of 2002) muutoksen jälkeen ja kehitystä on tilastojen valossa tapahtunut, on suuri osa Kenian asukkaista vielä ilman asianmukaisesti saatavilla olevaa puhdasta vettä. Kaupunkialueella lähes jokaisella asukkaalla on mahdollisuus edes

jonkinlaiseen veteen, mutta maalaisalueilla tilanne ei ole yhtä hyvä. Näillä alueilla vain 50 % asukkaista on mahdollisuus puhdistetun veden saamiseen. Tilastona tämä tarkoittaa sitä, että jopa 42 % kokonaisasukasmäärästä on ilman puhdasta vettä. Ongelmia ovat vedenlaadun lisäksi rahoitus, välimatkat sekä puhtaanapidon puute. (Kenia 2017; The Water Act 2002; The World Factbook 2017)

4.2 Vedenlähteet

4.2.1 Pintavedet

Kuvassa 7 näkyvät Kenian pintavedet. Länsirajalla on Victorianjärven valuma-alue, joka kuuluu Niilin joen valuma-alueeseen. Sisämaassa valuma-alue koostuu järvistä (esimerkiksi Naivasha-, ja Baringo-järvet sekä pohjoisen Turkana-järvi) sekä joista (esimerkiksi Kerio-joki). Kaakkois-Keniassa on eteläisempi Athi-joki sekä sen pohjoispuolelta Tana-joki. Näin ollen suuri osa pohjoisesta on kokonaan ilman kunnan vedenlähteitä. Lisäksi monet joet ja järvet valuma-alueineen kärsivät kausittaisesta kuivuudesta, ainoastaan Victorianjärvi ja Tana-joki valuma-alueineen pystyvät ylläpitämään vesimääräänsä ympäri vuoden. (Kenia 2006)



Kuva 7. Kenian pintavedet (Hydrogeology of Kenya 2017).

4.2.2 Pohjavesi

Arvioiden mukaan pohjavettä löytyy pääasiassa Victorianjärven valuma-alueelta. Varmoja arvioita pohjaveden määrästä ei ole saatavilla. Tästä huolimatta tiedetään, että Keniassa on ainakin 14000 porausreikää pohjaveden ottamiseksi. (Kenia 2006)

4.2.3 Suurimmat vedenlähteiden ongelmat

Kuten monissa muissakin Afrikan maissa, suurimpia vedenlähteiden ongelmia ovat veden saatavuus ja sen epätasaisesti jakautuminen maan sisällä. Noin 53 % kenialaisista saa talousvetensä turvallisesta lähteestä, kun taas loput 47 % joutuvat turvautumaan mm. joista, puroista ja järvistä saatavaan puhdistamattomaan veteen. Vaaralliset vedenlähteet yhdistettynä huonoon puhtaanapitoon (ainoastaan 43 % kenialaisista on asianmukaisen puhtaanapidon ja viemäröinnin alueella) altistavat suuren osan kenialaisista sairastumiselle. (Kenia 2006; Water and sanitation profile 2007)

5 VEDENOMINAISUUDET

5.1 WHO:n asettamat standardit talousvedelle

Yleisimpänä ohjeena puhtaalle vedelle käytetään Maailman terveysjärjestö WHO:n (World Health Organisation) määrittämiä kansainvälisiä normeja. Yli 600-sivuinen painos löytyy WHO:n nettisivuilta ilmaiseksi kaikille halukkaille pdf-muodossa. Taulukossa 1 nähdään WHO:n asettamia maksimipitoisuuksia aineille. Taulukossa ei ole mainintaa osasta Suomessa ja muualla Euroopassa yleisesti tutkituista pitoisuuksista (esimerkiksi rauta), sillä WHO on jättänyt ohjeistuksensa ulkopuolelle vesissä esiintyvien aineiden pitoisuudet, jotka eivät tuota haittaa terveydelle niinä määrinä kuin niitä on vesissä havaittu, vaan ovat lähinnä esteettisiä haittoja.

Jos WHO:n standardia verrataan esimerkiksi Suomessa käytettyyn sosiaali- ja terveysministeriön asetukseen talousveden laatuvaatimuksista, ovat Suomessa sallitut enimmäispitoisuudet joissakin määrin tiukempia. Toisaalta taas WHO:n standardissa on mainittu paljon kemiallisia tekijöitä, joita ei edes mainita Suomen talousvesivaatimuksissa. Suomen talousvesiasetuksessa on kuitenkin erilaisia vaatimuksia koskien esimerkiksi veden väriä ja pH:ta, joita WHO:n standardissa ei ole, sillä niitä ei katsota terveyshaitaksi. Molemmat standardit ovat kuitenkin yhtä mieltä siitä, että erilaisia koliformisia bakteereita tai enterokokkeja talousvedestä ei saa löytyä. (A 683/2017; Guidelines for drinking water quality 2017)

Taulukko 1. WHO:n asettamia kemiallisia enimmäispitoisuuksia talousvedelle.
(Guidelines for drinking water 2017)

Aine	Enimmäispitoisuus / mg/l
Bentseeni	0,01
Tolueeni	0,7
Lindaani	0,002
Etyylibentseeni	0,3
Nitriitti	3
Nitraatti	50
Endriini	0,0006
Vinyylikloridi	0,0003
Uraani	0,03
Boori	2,4
Perkloratti	0,07
Kadmium	0,003
Mangaani	0,4
Alumiini	0,2
Styreeni	0,02
Akryyliamidi	0,0005

Aine	Enimmäispitoisuus / mg/l
Kloriitti ja kloraatti	0,7
Fluoridi	1,5
Arseeni	0,01
Kromi	0,05
Lyijy	0,01
Elohopea	0,001
Antimoni	0,02
Seleeni	0,04
Hiilitetrakloridi	0,004
Kupari	2,0
Nikkeli	0,02
Bromaatti	0,01
Barium	1,3
Ksyleeni	0,5

5.2 Vedessä esiintyvät epäpuhtaudet

Taulukkoon 2 on koottu pääasialliset veden ongelmat ja näille sopivat puhdistustekniikat, joista lopullinen vedenpuhdistuskokonaisuus koostuu. Kuten aiemmin mainittiin, veden makua ja hajua ei ole otettu kokonaisuudessa huomioon. Taulukon alapuolella kerrotaan, mitä jokin vedenominaisuus (esimerkiksi *Cryptosporidium*) tarkoittaa ja miksi se on ongelma talousvedelle.

Taulukko 2. Vedenpuhdistuksen ongelmia ja niille sopivat puhdistustekniikat. (Binnie & Kimber 2013)

Ongelma	Puhdistustekniikka
Jätteet	Karkea- ja hienovälppäys
Suuret sedimenttimäärät	Laskeuttaminen
Sameus ja väri	Mikrosuodatus
Rauta ja mangaani	Klooraus, pH-kontrollointi
Nitraatti	Käänteisosmoosi
Tuholaismyrkyt	Käänteisosmoosi
Haihtuvat orgaaniset yhdisteet	Käänteisosmoosi
<i>Cryptosporidium</i>	Mikro- ja ultrasuodatus
Levät	Mikrosuodatus
Mikrobiologiset laatutekijät	Klooraus, pH-kontrollointi

Jätteillä tarkoitetaan kaikkea ylimääräistä, suurempaa roskaa, jota kulkeutuu veden mukana. Tällaisia ovat esimerkiksi kotitaloudesta syntyvät roskat joita joskus saatetaan viemäriin, kuten vaippoja tai muita hygieniatarvikkeita. Lisäksi pintavesien mukana saattaa kulkeutua oksia sekä muoveja jne.). Vesien mukana saattaa puhdistusprosessiin kulkeutua myös suuria määriä sedimenttiä eli maa-ainesta, joka tukkii vedenpuhdistusprosessin ja saattaa sisältää haitallisia yhdisteitä. Vaikka sameus ja väri eivät välttämättä olisikaan terveystarpeesta tarpeen poistaa, on ne huomioitu listalla, sillä valituilla puhdistustavoilla nämä poistuvat vedestä ”sivutuotteena”. Lisäksi nämä ominaisuudet saattavat aiheuttaa ongelmia, jos vettä käytetään teollisuudessa prosessivetenä. Sama koskee rautaa ja mangaania. Kyseiset aineet luovat lähinnä esteettistä haittaa, mutta saattavat vahingoittaa muun muassa vesiputkistoja tai teollisuuden työvälineitä. Joidenkin lähteiden mukaan mangaani saattaa myös aiheuttaa terveydellisiä haittoja lapsille. Esimerkiksi THL (Terveyden ja hyvinvoinnin laitos) kertoo, että vedessä esiintyvä mangaani on yhteydessä lasten hienomotoriseen kömpelyyteen, oppimis- ja käyttäytymishäiriöihin sekä alentuneeseen älykkyysosamäärään. Tämän vuoksi esimerkiksi WHO ei ole asettanut raudalle mitään maksimipitoisuutta talousvedessä, mutta mangaanille on. Myös Suomen sosiaali- ja terveysministeriön laatimassa asetuksessa talousveden laatuvaatimuksille mangaanille on asetettu enimmäisraja, jota ei aiemmin ole ollut. (Binnie & Kimber 2013; Mangaani on terveystarve juomavedessä 2013)

Nitraatti ja nitriitti ovat luonnossa esiintyviä yhdisteitä. Niitä käytetään myös monissa lihavalmisteissa sekä joissakin juustovalmisteissa säilyvyyden parantamiseksi. Tästä huolimatta ne voivat suurina määrinä aiheuttaa methemoglobiniemias, joka tarkoittaa huonoa hapen kulkemista. Yhdisteiden uskotaan olevan lähde myös muille terveyshaitoille, mutta yksiselitteistä tutkimustietoa ei ole saatavilla. Evira (Elintarviketurvallisuusvirasto) kuitenkin epäilee liian nitriitin lisäävän mm. diabeteksen, syövän ja sepelvaltimotaudin riskiä. (Binnie & Kimber 2013; Elintarvikkeet 2016)

Tuholaismyrkkyjen poistaminen talousvedestä on luonnollisesti tärkeää, erityisesti Afrikan maissa, jossa maanviljelyn vuoksi tuholaismyrkkyjen käyttäminen on varsin yleistä. WHO:n arvion mukaan tuholaismyrkyt aiheuttavat vuosittain noin 3 miljoonaa myrkytystä, joista noin 220 000 johtaa kuolemaan. Suuri osa tapauksista keskittyy juuri kehitysmaihin, joissa rajoituksia ja valvontaa ei ole samalla tavalla kuin kehittyneemmissä maissa. (Lah 2011)

Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC, Volatile Organic Compounds) löytyy ympäristöstä ihan luonnostaan, joten niiltä on mahdoton kokonaan välttyä, eivätkä kaikki niistä ole haitallisia. Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä syntyy myös ihmisen toiminnan seurauksena. Osa haihtuvista orgaanisista yhdisteistä saattaa pitkäaikaisen altistumisen seurauksena aiheuttaa maksa- ja munuaisongelmia tai vaikuttaa jopa keskushermoston kykyyn. Lyhytaikainen altistuminen aiheuttaa mm. silmien tai hengitysteiden ärsyntyä, päänsärkyä, pahoinvointia, koordinaatiokyvyn heikkenemistä ja allergisia ihoreaktioita. Toiset ihmiset reagoivat herkemmin kuin toiset. Haitallisia VOC-aineita esiintyy esimerkiksi liikennepäästöissä ja erilaisissa liuottimissa, liimoissa ja maaleissa. VOC-yhdisteet ovat helposti veteen liukenevia. (Volatile organic compounds 2017)

Cryptosporidium tai *Cryptosporidium parvum* on alkueläin, joka aiheuttaa henkilöstä riippuen voimakasta mahatauti (joissakin suomenkielisissä lähteissä kirjoitusasu on kryptosporidium). Heikon vastustuskyvyn omaaville ihmisille se saattaa olla jopa hengenvaarallinen. *Cryptosporidium* tarttuu eläimen tai ihmisen ulosteesta saastuneesta talous- tai uimavedestä sekä elintarvikkeista. Se voi myös tarttua ihmiseen myös suoraan eläimestä tai toisesta ihmisestä. Ongelmallisen *Cryptosporidium*ista tekee se, että se on vaikea havaita. Maailmalla on ollut joitakin huomattavia epidemioita, vuonna 1993 Milwaukeeessa saastuneesta vedestä sairastui yli 400 000 ihmistä. (Binnie & Kimber 2013; *Cryptosporidium* 2015)

Levien poistaminen talousvedestä on tarpeellista, sillä osa levistä tuottaa myrkkyjä. Yksi näistä on syanobakteeri, joka tunnetaan myös nimellä sinibakteeri tai sini-

levä. Se saattaa aiheuttaa vaurioita niin maksassa kuin keskushermostossakin. (Binnie & Kimber 2013)

Mikrobiologiset laatutekijät käsittävät patogeeniset eli tauteja aiheuttavat mikro-organismit, jotka ovat yksi akuutein riski ihmisen terveylle. Näitä ovat mm. koliformiset bakteerit, fekaaliset koliformiset bakteerit, pesäkkeiden lukumäärät (pmy) ja fekaalinen streptokokki. Esimerkiksi fekaalisen streptokokin tai koliformisen bakteerin esiintymisen vedessä ajatellaan kertovan vedenlähteen saastumisesta ulosteella. Esimerkiksi *Escherichia coli* ja kaikenlaiset enterokokit lasketaan mikrobiologisiin laatutekijöihin. Erilaisten taudinaiheuttajien poistaminen talousvedestä tulisi olla itsestäänselvyys. (Binnie & Kimber 2013)

5.3 Vedentarve

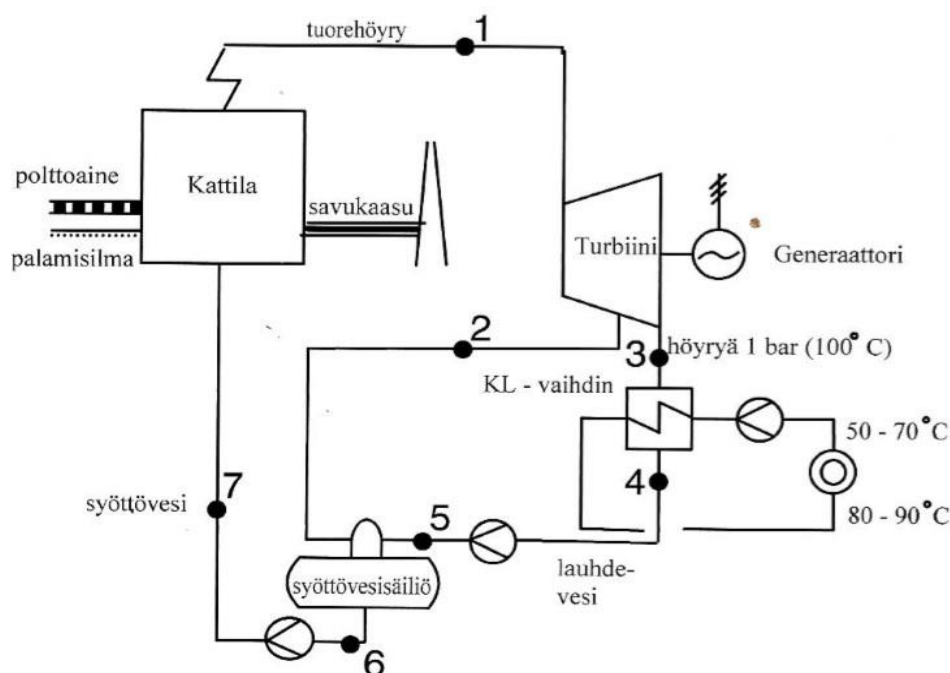
Talousveden lisäksi muunlaisen käyttöveden tarve niin Keniassa, Ghanassa, Namibiassa kuin muissakin Afrikan maissa on suuri. Kaikissa kohdemaissa maanviljely ja maatalous ovat suuressa osassa, jolloin tarve kasteluvedelle ja karjan juomavedelle on merkittävä. Lisäksi vettä tarvitaan teollisuudelle ja kaivostoimintaan.

Keniassa maatalous tuottaa noin 50 % maan viennistä ja työllistää noin 80 % maan asukkaista. Käytetystä vedestä vuonna 2010 kasteluun meni 50 %, 9 % karjan- ja kalankasvatukseen sekä 4 % teollisuuteen. (Kenia 2006; Kenia 2016)

Ghanassa maatalouteen kului 66 % käytetystä vedestä vuonna 2000. Teollisuuden vastaava osuus oli 10 %. Namibiassa vuonna 2000 käytetystä vedestä 71 % meni puolestaan maatalouteen ja teollisuudelle 5 %. Koko Afrikassa käytetystä vedestä kulutettiin noin 85 % maatalouteen, 10 % kotitalouksiin ja vain 5 % teollisuuteen. (Ghana 2016; Namibia 2005; Water consumption in Africa 2005)

6 HÖYRYTURBIINIVOIMALAITOSTEKNIikka JA -VEDET

Höyry(turbiini)voimalaitosten perusideana on, että tuotetaan sähköä hyödyntäen veden ja höyryn kiertoprosessia. Höyryvoimalaitokset voidaan jakaa joko vastapainevoimalaitoksiin tai lauhdutusvoimalaitoksiin niiden ulos tulevan höyryn paineen perusteella. Vastapainevoimalaitoksia voidaan käyttää lämmitystarkoitukseen, sillä niistä ulos tuleva höyryn paine on tarpeeksi korkea. Lauhdutusvoimalaitosten turbiinista ulos tulevan höyryn paine on puolestaan niin alhainen, että lauhdutusvoimalaitokset on tarkoitettu ainoastaan sähköntuotantoon. Höyryturbiinivoimalaitoksen perinteinen prosessikaavio nähdään kuvassa 8. (Huhtinen, Korhonen, Pimiä & Urpalainen 2013)



Kuva 8. Esimerkki höyryturbiinivoimalaitoksen prosessikaaviosta. (Huhtinen ym. 2013)

Höyryvoimalaitoksen peruskomponentteihin kuuluvat kattila, turbiini, syöttövesisäiliö, syöttövesi- ja lauhdepumput sekä kaukolämmön vaihdin (mikäli höyryvoimalaitosta käytetään sähköntuotannon lisäksi kaukolämmön tuotantoon). (Huhtinen ym. 2013)

Polttoaineen muuttaminen sähköksi alkaa polttoaineen palaessa höyrykattilassa, jolloin polttoaineen sitoutunut (kemiallinen) energia muuntuu savukaasujen lämpöenergiaksi. Tämän jälkeen kattilassa olevat lämmönsiirtimet pyrkivät siirtämään savukaasujen lämpöenergian mahdollisimman tehokkaasti eteenpäin kattilaan syötettävän veden lämmitykseen ja höyrystykseen sekä höyryn lämmitykseen, eli tulistukseen. Höyryn paine- ja lämpöenergiaa muutetaan turbiinissa akselia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi, jolloin turbiinin pyörittämässä generaattorissa mekaaninen energia muutetaan lopulta sähköksi. (Huhtinen ym. 2013)

Kiertoprosessi saadaan aikaiseksi muuttamalla turbiinista ulos tuleva höyry vedeksi, joka syötetään takaisin kattilaan uudestaan höyrystettäväksi. Yleensä turbiinista tuleva höyry muutetaan vedeksi lämmönsiirtimessä, joka on vesijäähdytteinen. Lämmönsiirtimessä lauhtumisen johdosta vapautunut lämpö siirtyy lämmön vastaanottavaan jo lämpenevään veteen. (Huhtinen ym. 2013)

Prohocin höyryturbiinivoimalaitoksessa kiertää vettä 17 tonnia. Veden laatu laskee hieman prosessin aikana, jonka vuoksi prosessivettä poistetaan 2–5 % tunnissa, ja se korvataan uudella puhtaalla prosessivedellä. Laitoksen jäähdytysprosesseissa suurin osa, noin 85 %, kuluu höyrylauhduttimen jäähdytykseen, kun taas turbiini öljyn, generaattorin ja tyhjiöpumppu käyttävät yhteensä noin 10 % jäähdytysvedestä.

6.1 Höyryturbiinivoimalaitoksen veden ominaisuudet

Teollisuudessa käytetty vesi vaihtelee laatuvaatimuksiltaan sen mukaan, minkälaisessa prosessissa vettä käytetään. Minkäänlaista valmista standardia höyryvoimalaitosten vesille ei ole, mutta erilaisia laatusuosituksia löytyy kyllä. Veden ominaisuuksia määrittäessä tulee ottaa huomioon mm. höyrykattilan käyttötapa ja

-paine sekä rakenne, lämpökuorman koko sekä luonnollisesti höyryn käyttötarkoitus. Riippuen lähtövedestä, siinä saattaa olla höyryvoimalaitokselle haitallisia epäpuhtauksia aina hapestä erilaisiin metalleihin asti. Erot höyryvoimalaitoksen käyttövesissä ovat merkittävät esimerkiksi talousveteen verrattuna, sillä höyryvoimalaitoksen vesissä huomioidaan talousvedestä poiketen mm. veden kovuus. (Huhtinen ym. 2013)

Höyryturbiinivoimalaitoksen veden tulee olla erittäin puhdasta, sillä erilaiset epäpuhtaudet vaikuttavat helposti koko prosessin toimintaan. Esimerkiksi yleisimmät kattilakiven muodostajat ovat magnesium, kalsium sekä silikaatti eli piioksidi. Kattilaan päässeet kalsium ja magnesium saostuvat veden lämpötilan kohotessa sekä suolapitoisuuden kasvaessa kovettuen karbonaatteina sekä sulfaatteina. Myös silikaatti saattaa saostua päästessään yhteyteen suolojen kanssa. Tämän vuoksi vedestä tulee poistaa myös suolat. Silikaatti saattaa lisäksi reagoida yhdessä alumiinin kanssa. Erilaisten saostumien johdosta kattilaan saattaa muodostua vaikeasti poistettava kerrostuma, jonka vuoksi kattilan toimintatehokkuus heikentyy tai pahimmassa tapauksessa jopa rikkoo kattilan. Korroosiota kattilaan aiheuttavat rauta ja kupari yhdessä hapen kanssa. Lisäksi kiinteä rauta palaa kiinni höyrystyspintoihin, muodostaen mustan magnetiittikalvon. Jos tämä kalvo kasvaa raudan johdosta liian paksuksi, se voi lämpötilavaihteluiden vuoksi hajoilla päästään kappaleita prosessiin. (Huhtinen ym. 2013)

Turbiini on erityisen herkkä epäpuhtauksille. Silikaattia pääsee kattilasta turbiinin siivistöön, kun höyrynpaine kattilassa kasvaa. Tämän lisäksi natrium, kalium sekä alkalit saattavat aiheuttaa alkalikorroosiota saostuessaan turbiinin siivistöön. Raudan kattilaan muodostaman magnetiittikalvon kappaleet aiheuttavat turbiiniin jouutuessaan eroosiota. Myös höyrystimeen kerrostunut kuparia saattaa aiheuttaa turbiiniin päästessään korroosiota. (Huhtinen ym. 2013)

Lauhduttimeen siirtyy höyryn mukana hiilidioksidia, joka lauhtuessaan muodostaa hiilihappoa ja aiheuttaa näin pH-arvon laskua. Tämän seurauksena happamuudes-

ta aiheutuu syöpymistä. Syöpyminen voidaan kuitenkin estää neutraloimalla hiilihappo joko ammoniakki- tai hydratsiiniannostelulla. (Huhtinen ym. 2013)

Edellä mainittujen epäpuhtauksien aiheuttamien ongelmien lisäksi kaikenlaiset kiintoaineet prosessivedessä saattavat aiheuttaa kiertoprosessissa tukkeumia tai aiheuttaa kaikille pinnoille haitallisia kerrostumia. Jopa happi on höyryturbiinivoimalan prosessivesissä epäpuhtaus, sillä se on suuri korroosion kiihdyttäjä. Orgaaninen aines saattaa kiintoaineiden tavoin aiheuttaa kerrostumia ja lisäksi kattilaveden kuohumista. Öljy on erityisen haitallista lämmönsiirtopinnoille, sillä se muodostaa näiden päälle eristävän kalvon. (Huhtinen ym. 2013)

Kuten edeltä näemme, höyryturbiinivoimalaitoksen vesien tulee olla erittäin puhtaita, ettei prosessi häiriinny. Taulukoissa 3 ja 4 näemme joitakin laatuvaatimuksia syöttövedelle ja kattilavedelle. (Huhtinen ym 2013)

Taulukko 3. Syöttöveden laatuvaatimukset (Huhtinen ym. 2013).

Muuttuja	Yksikkö	Käyttöpaine 0,5–20 bar	Käyttöpaine 20–40 bar	Käyttöpaine 40–100 bar
pH-arvo (25°C lämpötila)	–	> 9,2	> 9,2	> 9,2
Kokonaiskovuus (Ca+Mg)	mmol/l	< 0,02	< 0,01	> 0,005
Rauta (Fe)	mg/l	< 0,05	< 0,03	< 0,02
Kupari (Cu)	mg/l	< 0,02	< 0,01	<0,003
Happi (O ₂)	mg/l	< 0,002	< 0,002	< 0,002
Öljy-rasva (EN 12952-7)	mg/l	< 1,0	< 0,5	0,5

Vaatimukset vaihtelevat hieman käyttöpaineen mukaan. Taulukon arvot ovat lisäksi ainoastaan suuntaa-antavia, ja jokaisen höyryturbiinivoimalaitoksen yksilölliset vaatimukset tulee selvittää ennen käyttöönottoa. Taulukossa 3 tulee lisäksi huomioida, että käyttöpaineen ollessa alle 1 bar, suurin hyväksyttävä arvo kokonaiskovuudelle on 0,05 mmol/l. (Huhtinen ym. 2013)

Taulukko 4. Kattilaveden laatuvaatimuksia. (Huhtinen ym. 2013)

Muuttuja	Yksikkö	Käyttöpaine 0,5–20 bar	Käyttöpaine 20–40 bar	Käyttöpaine 40–60 bar	Käyttöpaine 60–100 bar
pH-arvo (25°C lämpötila)	–	10,5–12,0	10,5–11,8	10,3–11,5	9,8–10,5
Suora sähkönjohtavuus (25°C lämpötila)	μS/cm	6000	3000–6000	1500–3000	150–800
Alkaliteetti	mmol/l	1,0–15,0	1,0–10,0	0,5–5,0	0,1–0,3
Silikaatti	mg/l	< 160	50–130	12,0–40	2,0–12,0
Fosfaatti	mg/l	10–20	8,0–15	8,0–15	< 6,0

Taulukkoa 4 tarkasteltaessa tulee ottaa huomioon, että tulistimen kanssa suurimpana arvona pidetään 50 % ilmoitetusta ylärajasta. (Huhtinen ym. 2013)

Höyryturbiinivoimalaitoksessa on luonnollisesti monia jäähdytyskohteita, joita jäähdytetään vedellä. Tällaisia ovat esimerkiksi turbiinien voiteluöljyn ja generaattoreiden jäähdyttimet, paineilmalaitteet sekä näytejäähdyttimet. Vaikka höyryvoimalaitoksen syöttö- ja kattilaveden laatuvaatimukset ovat todella tarkat, jäähdytysveden tärkein ominaisuus on korroosion välttämisen vuoksi suolattomuus. (Huhtinen ym. 2013)

7 VEDENPUHDISTAMINEN

Ehdotetuissa puhdistusmenetelmissä on otettu huomioon niiden soveltuvuus aiemmin tässä työssä määritellyille suurimmille raakavesien ongelmille sekä Prohocin asettamat rajat vedenpuhdistuksen kapasiteetille. Lisäksi on huomioitu valmiin vedenpuhdistamon ylläpidon helppous. Lopputulokseksi puhdistettavasta vedestä halutaan talousvettä. Talousvedeksi lasketaan kaikki vesi, jota käytetään juomavetenä tai ruoanvalmistuksessa. Koska kyse on maista, joissa puhtaasta vedestä on paikoittain todellinen pula, on lopputuotteessa tarkoitus päästä puhtauden osalta turvalliseen tulokseen, eikä päähuomio ole esimerkiksi maussa tai hajussa. (Guidelines for drinking water 2017; Talousvesi 2016)

Prohocin tavoitteena on tuottaa vedenpuhdistamo, jonka voi pakata osissa merikontteihin ja koota paikan päällä. Näin ollen biologisten puhdistusmenetelmien sijasta keskitytään erilaisiin teknisiin puhdistusratkaisuihin. Vaikka biokemiallisia prosesseja ja biologisia organismeja hyödyntävät menetelmät ovatkin usein tehokkaita, ne vaativat ideaaliset toimintaolosuhteet. Prohocin käyttötarkoitukseen biologiset puhdistusmenetelmät ovat yksinkertaisesti liian hankalia toteuttaa sekä liian herkkiä muutoksille.

7.1 Vedenpuhdistuksen vaiheet

Luvussa 5.2 esitetyssä taulukossa 2 näkyy raakavedessä yleisesti esiintyviä ongelmia ja mahdollisia ratkaisuja näiden ongelmien poistamiseen vedestä. Tässä kappaleessa keskitytään erilaisten puhdistustekniikoiden esittelyyn.

Välppäys (screening) on aina ensimmäinen vaihe pintavesien vedenpuhdistuksessa. Se voidaan jakaa tarpeen mukaan hieno- ja karkeavälppäykseen. Ensin vesi ajetaan ristikon tai säleikön, toisin sanoen karkeavälppän (kutsutaan myös harvavälppäksi), läpi, jotta kaikki suuremmat epäpuhtaudet (puunoksat, muovipussit jne.) saadaan pois ennen puhdistusprosessin aloitusta. Tämän jälkeen vuorossa on välppäyksen toinen osa, jossa vesi kuljetetaan hienovälppän läpi, jossa on siis har-

vavälppää pienemmät välit. Karkeaväljän tarpeellisuus arvioidaan lähtövedestä riippuen, yleensä pintavesien puhdistuksessa se on tarpeen. Myös hienovälppäys tehdään tarpeen mukaan. Esimerkiksi pohjavettä puhdistessa se ei ole tarpeen, kun taas pintavesien mukana oleva mahdollinen materia sen vaatii. Myös esimerkiksi erilaisia jätevesiä puhdistettaessa välppäyksille voi olla oma paikkansa. (Binnie & Kimber 2013)

Laskeuttaminen on myös yksi esikäsittelyn vaiheista ja se on tarpeen silloin, kun puhdistettavassa vedessä on huomattavan paljon sedimenttiä mukana. Välppäyksen jälkeen vesi ajetaan laskeutusaltaaseen, jossa veden seisoessa sedimentti laskeutuu altaan pohjalle ja on näin helppo erottaa vedestä. Tämä toimii siis vain poikkeuksellisen suurille sedimenttimäärille, joita tulee joskus tietyn tyyppisten jokien veden mukana, tai esimerkiksi poikkeuksellisen nopean eroosion vuoksi. Mikäli puhutaan pienemmistä ja hienommista sedimenttimääristä, laskeuttamisella ei saada aikaan toivottua tulosta. (Binnie & Kimber 2013)

Koaguloinnin ja flokkauksen tarkoituksena on luoda pienistä osista sen kokoisia partikkeleita, että ne voidaan poistaa vedestä joko laskeuttamalla, flotaatiolla tai suodattamalla. Tässä puhdistustekniikassa veteen lisätään haluttu koagulantti, jonka seurauksena partikkelit tarttuvat toisiinsa, sitoen samalla itseensä veden epäpuhtauksia. Yleisimpiä koagulantteja ovat erilaiset rauta- ja alumiinijohdannaiset. (Binnie & Kimber 2013)

Mikro-suodatus tapahtuu kalvotekniikalla. Siinä vesi ajetaan kalvon läpi, jolloin kalvo poistaa kaikki 0,1–100 µm kokoiset partikkelit, kalvon valinnasta riippuen. Tällä tekniikalla voidaan vaikuttaa veden sameuteen ja väriin ja poistaa leviä sekä parhaimmillaan jopa cryptosporidiumin, vaikka yleensä tähän käytetään vielä pienempää huokoskokoa. (Binnie & Kimber 2013)

Ultrasuodatus toteutetaan myös kalvotekniikalla. Toimintaperiaate on sama kuin mikro-suodatuksessa, mutta ultrasuodattimella voidaan poistaa jopa 0,001–0,1 µm kokoisia partikkeleita, eli parhaimmillaan suuria orgaanisia molekyylejä. Ylei-

simmin ultrasuodatusta on käytetty varmistamaan cryptosporidiumin ja muiden taudinaiheuttajien poisto. (Binnie & Kimber 2013)

Nanosuodatusta ei käytetä kovin paljon vedenpuhdistuksessa, sillä se ei ole talousvettä tehtäessä kovin tarpeellinen (tai taloudellinen) ultrasuodatuksen ja käänteisosmoositekniikan lisänä. Vaikka nanosuodatus muistuttaa käänteisosmoosia, siihen käytetty paine on käänteisosmoosia pienempi ja materiaali läpäisevämpää, jolloin puhdistustuloskaan ei ole käänteisosmoosikalvolla saavutettavaa luokkaa. (Binnie & Kimber 2013)

Käänteisosmoosissa vesi pakotetaan paineen avulla puoliläpäisevän kalvon läpi, väkevämmästä liuoksesta laimeampaan päin. Käänteisosmoosi on tärkeä osa puhdistusprosessia, sillä sen avulla voidaan ilman kemikaaleja poistaa vedestä niin nitraatteja, tuholaismyrkkyjä kuin haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. Lisäksi sillä voidaan poistaa vedestä suolaisuutta. Periaatteessa käänteisosmoosilla saadaan poistettua vedestä kaikki partikkelit ja liuenneet kemikaalit. Käänteisosmoosi on siis yksi kalvotekniikoista. Käänteisosmoosikalvot voidaan optimoida poistamaan tietynkokoisia liuenneita molekyylejä ja ioneja ja erilaisia käänteisosmoosikalvoja yhdistämällä päästään hyvinkin puhtaaseen lopputulokseen. (Binnie & Kimber 2013)

Raudan ja mangaanin poisto sekä mikro-organismien poisto tehdään joko kloorauksella tai pH-kontrollin avulla. Klooraus on tärkeää erityisesti juomaveden kohdalla, sillä sen avulla vedestä tuhoetaan mahdolliset taudinaiheuttajat. Kloorauksessa vesi desinfioidaan lisäämällä veteen haluttua kloorikemikaalia. Klooraus voidaan korvata mm. UV-säteilytyksellä. Siinä vesi juoksuutetaan UV-lampun (yhden tai useamman, riippuu puhdistettavan veden määrästä) ohi, jolloin UV-säteily tappaa vedessä olevat mikrobit. pH-kontrollointi voi olla tarpeen pH:n säätämiseksi tarvittavalle tasolle puhdistusprosessin alussa. Puhdistuksen loppuvaiheessa pH:ta säädellään puolestaan korroosion ehkäisemiseksi. (Binnie & Kimber 2013)

Yllä olevat puhdistustavat on mainittu Prohociin puhdistusintressejä ajatellen. Kaikki vedenpuhdistustavat eivät sovi Prohociin toteutustekniikkaan monimutkaisuutensa ja jatkuvan valvonnan vaatimisen vuoksi. Esimerkiksi biologisissa puhdistustavoissa, joissa käytetään hyväksi biokemiallisia prosesseja sekä biologisia organismeja, mikro-organismit käyttävät liuenneet ja kolloidikokoiset orgaaniset materiat ravintona, puhdistuen näin vettä. Puhdistustapa on yleinen varsinkin Suomen kunnissa ja kaupungeissa jätevedettä puhdistettaessa taloudellisuutensa vuoksi. Tapaa ei käytetä talousvettä puhdistettaessa, ellei lähtövetenä käytetä jätevedettä. Ylläpito on kuitenkin vaativaa prosessin herkkyyden vuoksi, eikä siksi välttämättä miellytä puhdistustekniikkana, kun tarkoitus on myydä vedenpuhdistustuotetta toiselle osapuolelle. Jo pelkkä liiallinen lämpötilan vaihtelu prosessissa voi tappaa puhdistukseen tarvittavat organismit. Puhdistusprosessin aloittaminen uudestaan saattaa kestää jopa viikkoja, sopivan organismikannan kasvaessa takaisin. (Binnie & Kimber 2013)

Vaikka biologiset puhdistusratkaisut ovatkin tehokkaita, nykyteknologialla voidaan puhdistaa jopa jätevedestä talousvettä turvautuen vain teknisiin ratkaisuihin. Yleensä yksi merkittävimmistä valintakriteereistä puhdistusprosessia rakennettaessa onkin raha.

7.2 Tulevaisuuden vedenpuhdistustekniikat

Puhtaan veden tarve lisääntyy jatkuvasti ja saatavilla olevan veden määrä vähenee. Tämän vuoksi uusia vedenpuhdistustekniikoita kehitetään jatkuvasti. Tälläkin hetkellä kehitysvaiheessa on useita erilaisia vedenpuhdistustekniikoita tai kehittyneempiä versioita jo olemassa olevista.

7.2.1 Elektrokoagulointi

Ecla Water Finland Oy on vuonna 2016 perustettu kuopiolainen vedenpuhdistukseen erikoistunut yritys. Yritys on patentoinut EcLa (Electrocoagulation Lamella) vedenpuhdistuslaitteen, jonka tekniikka perustuu elektrokoagulaatioon ja veden elektrolyysiin. Vedenpuhdistuskapasiteetti on 3 m³ tunnissa. Omien sanojensa

mukaan tuote poistaa kaikki hormonit, bakteerit ja virukset ja puhdistaa kaikki myrkyt. Lisäksi laitteen luvataan puhdistavan kaikenlaisia jätevesiä pienellä energiamäärällä ja halvalla ylläpidolla ilman minkäänlaisia lisättäviä koagulointikemikaaleja. Valitettavasti yrityksestä ja sen tuotteesta on saatavilla informaatiota varsin rajallisesti. (Ecla 2012)

Elektrokoagulointi on kuitenkin ollut vedenpuhdistuskehityksessä mukana jo aiemmin. Ulkomailta löytyy paljon erilaisilla tekniikoilla toteutettuja ratkaisuja, joissa pohjimmaisena puhdistustekniikkana on elektrokoagulointi. Teoriassa helposti kulkeutuva yksinkertainen vedenpuhdistamo kuulostaa hyvältä. Elektrokoaguloinnissa on toki huonojakin puolia, esimerkiksi hapetuksen seurauksena puhdistukseen tarvittavat anodit liukenevat veteen, jolloin ne täytyy säännöllisesti uusia. Uskon kuitenkin, että teknologioiden kehittyessä elektrokoagulaatio on vedenpuhdistuksessa varteenotettava vaihtoehto. (Electrocoagulation 2017)

7.2.2 Biopolymeeripohjaiset vedenpuhdistusmateriaalit

Siilinjärveltä kotoisin oleva uusi yritys BioSO4 Oy haluaa kaupallistaa biopolymeeripohjaisia vedenpuhdistusmateriaaleja sekä pilotoida ratkaisujen toimivuutta asiakkaan prosesseissa. Heidän tutkimustensa perusteella kitosaanilla, jota saadaan mm. ravun kuorista, voidaan vesien sulfaatit poistaa lähes kokonaan. Hyvän puhdistustehon lisäksi biopolymeeripohjaisen absorptiomateriaalin positiivinen puoli on se, että absorbentti sekä siihen kiinnittynyt sulfaatti voidaan käyttää uudelleen. Huonona puolena puhdistustekniikassa on sen yksipuolisuus, sillä tois-taiseksi tällä tekniikalla ei pystytä kuin lähinnä sulfaattien poistoon. Tekniikka on kuitenkin erinomainen vaihtoehto esimerkiksi monille teollisuuden yritykselle, jotka käyttävät jäähdytysvetenään merivettä. (Uutiset 2017)

7.2.3 Nanoteknologia

Nanomateriaalit voidaan luokitella monin eri tavoin. Yksi tapa luokitella nanomateriaalit on jakaa ne neljään ryhmään niiden rakenteen mukaan, hiilipohjaisiin materiaaleihin, metallipohjaisiin materiaaleihin, dendrimeereihin ja komposiitteihin.

Nanomateriaaleilla on paljon hyviä katalyyttisiä, magneettisia, sähköisiä ja lämpötermisiä ominaisuuksia, joita hyödynnetään niin vedenpuhdistuksessa kuin teknologiassa muutenkin. Esimerkiksi hiilinanoputkia hyödynnetään vedenpuhdistuksessa niiden hydrofobisen ominaisuuden vuoksi: vesi juoksee putken läpi nopeasti hiilinanoputkien vettä hylkivän ominaisuuden vuoksi, mutta monet suolat, ionit ja epäpuhtaudet tarttuvat putkeen kiinni. Raskasmetallien poistamiseen vedestä käytetään monia eri nanokokoisia metalleja tai metallioksiedeja (esimerkiksi ferrioksidit, titaanioksidit, magnesiumoksidit ja kuparioksidit). UV-valolla aktivoitu fotokatalyyysi puolestaan hapettaa orgaanisia epäpuhtauksia myrkyttömiksi tuotteiksi. Lisäksi erilaisia nanosuodatuskalvoja kehitetään jatkuvasti. (Roy & Bhattacharya 2015)

7.2.4 Biomimeettiset kalvot

Biomimeettisten kalvojen kehitystyö on yksi tapa etsiä uusia vedenpuhdistustapoja, jotka olisivat nykyisin yleisesti käytössä olevien tekniikoiden kanssa yhtä tehokkaita, mutta veisivät vähemmän energiaa. Biomimeettisen puhdistuksen taustalla on ajatus hyödyntää luonnon omia keinoja puhdistaa vettä, tapaa jolla vettä kuljetetaan solujen läpi (esimerkiksi kasveissa). Yksi biomimeettinen puhdistustapa on luoda biomimeettisiä kalvoja, joissa hyödynnetään eräänlaisia vesikanavia (aquaporins). Aquaporin proteiinit muodostavat kalvon pinnalle ikään kuin kanavia, joiden läpi ainoastaan vesi pääsee. Epäpuhtauksien erottaminen perustuu sähköstaattiseen repulsioon eli hylkimiseen kalvon pinnalla. Toisessa tavassa aquaporin proteiinien sijasta kalvolla hyödynnetään epäorgaanisia materiaaleja. Nanoteknologian ansiosta samantapainen prosessi pystytään toteuttamaan käyttämällä esimerkiksi silikaa. (Pearce 2017)

Biomimeettisten kalvojen kehitys on lupaavaa, mutta teknisten ja kemiallisten säätelyongelmien lisäksi ongelmana on tarvittavien puhdistavien aineiden saaminen massatuotantoon tarvittavissa määrissä. Saatavuuteen vaikuttavat monesti hinnan lisäksi lainsäädäntö. (Perry, Madsen, Jørgensen, Braekevelt, Lauritzen & Hélix-Nielsen 2015)

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vedenpuhdistus on aiheena erittäin laaja, ja erilaisia vaihtoehtoja on olemassa yksinkertaisista tekniikoista monimutkaisempiin ratkaisuihin. Työssä päädyttiin tekniisiin ratkaisuihin Prohoc Oy:n asettamien vaatimusten perusteella: halutaan lopputuotteena puhdistusprosessi, joka voidaan valmistaa Suomessa, kuljettaa kohdemaahan merikonteissa, jonka jälkeen paikan päällä tapahtuisi ainoastaan puhdistuslaitoksen kokoaminen ja käyttöönotto. Koska puhdistusprosessia olisi tarkoitus myydä kolmannelle osapuolelle, tulisi käytön ja ylläpidon olla mahdollisimman yksinkertaisia, jotta prosessin hyödyntäminen ja ylläpito onnistuisi mahdollisimman vähällä osaamisella myös loppukäyttäjältä. Näiden kriteereiden vuoksi biologiset puhdistuskeinot eivät ole varteenotettava vaihtoehto, vaikka tekniset ratkaisut vievätkin monesti enemmän energiaa ja saattavat tulla kalliimmaksi.

Kun puhutaan Afrikan vesien puhdistamisesta, kohdataan monia haasteita. Yksi suurimmista on veden saatavuus, kuivat kaudet ja vesilähteiden epätasainen jakautuminen tekevät vedensaannin haasteelliseksi. Veden saatavuuteen on kuitenkin hankala vaikuttaa. Toinen merkittävä ongelma on vedenlaatu: kehitysmaiden ympäristönsuojelu ja jätteidenkäsittely on ollut pitkään hyvin vähällä huomiolla, minkä johdosta useita vesistöjä on saastunut, joko hieman tai hyvinkin vakavasti. Yksi suurimmista Afrikassa tapahtuvan vedenpuhdistuksen haasteista onkin se, että lähtövedet saattavat sisältää melkein mitä epäpuhtauksia tahansa. Laaja kaivostoiminta on johtanut mm. kohonneisiin metalleihin jopa pohjavedessä asti ja Afrikan pääelinkeinona toimiva maatalous on saastuttanut vesiä tuholaismyrkyillä. Huonosti toimiva jätehuolto on luonut oman osansa vesien epäpuhtauksista. Ghanan, Namibian ja Kenian vesiä puhdistettaessa onkin tärkeää, että ennen puhdistusprosessin optimointia ja aloitusta selvitetään mahdollisimman hyvin, mitä kaikkia epäpuhtauksia puhdistettavassa vedessä on.

Opinnäytetyössä ehdotetut puhdistuskokonaisuudet painottuvat kalvotekniikoihin. Kun puhdistettavasta vedestä halutaan lopputuotteena talousvettä tai höyryturbiini-

nivoimalan prosessivettä, joki- tai järvivettä käytettäessä prosessi aloitetaan välipäyksellä. Pohjavettä puhdistettaessa tämä ei ole tarpeen. Mikäli rankka sadekausi on tuonut esimerkiksi jokiveteen poikkeuksellisen suuria määriä sedimenttiä, puhdistusprosessin keventämiseksi vesi johdetaan ensin laskeutusaltaaseen suurimpien sedimenttimäärien poistamiseksi. Normaalioloissa tämä ei ole tarpeen. Seuraava puhdistusvaihe on koagulointi ja flokkaus, jotta epäpuhtauksien poistaminen kalvotekniikoita hyödyntäen onnistuisi mahdollisimman hyvin.

Tämän jälkeen vedenpuhdistuksessa päästään itse kalvotekniikoihin. Lähtövedestä riippuu, minkälaisen puhdistuskokonaisuuden vesi käy läpi. Koska höyryturbiinivoimalaitoksen prosessiveden vaatimukset ovat prosessin turvaamiseksi talousvettä tiukemmat, myös puhdistusprosessi on luonnollisesti vaativampi. Talousvettä puhdistettaessa prosessi koostuu mikrosuoduksesta, ultrasuoduksesta sekä käänteisosmoosista. Prosessiveden puhdistusprosessiin saattaa olla paikallaan lisätä ultrasuodatuksen ja käänteisosmoosin väliin vielä nanosuodatus, jotta voidaan varmistaa mahdollisimman hyvä, eli puhdas, lopputulos. Molemmissa puhdistusprosesseissa lopputulokseen voidaan vaikuttaa kalvojen määrällä ja laadulla. Esimerkiksi käänteisosmoosikalvojen optimoinnilla voidaan eri kalvoille asettaa erilaiset lähtöveden vaatimat puhdistusrajat. Tämän vuoksi saattaa olla tarpeen hyödyntää samaa kalvotekniikkaa useammin kuin kerran, optimoimalla jokainen erillinen kalvo tiettyyn molekyylikokoon.

Kalvopuhdistuksen jälkeen vesi on jo suhteellisen puhdasta. Mikäli vesi menee talouskäyttöön, tulee vesi vielä kloorata ennen jakeluun siirtämistä. pH-kontrollointi ei talousvedessä ole välttämättä tarpeen, mutta mikäli huolenaiheena on vedenpuhtauden lisäksi jakelukanavien mahdollinen korroosio, tulee myös pH-arvo tarkistaa. Höyryvoimalan prosessiveden loppupuhdistukseen kloorauksen sijaan voidaan valita UV-säteilytys. Vaativaan prosessiveteen lisätään vielä kemikaaleja prosessiveden oikeanlaisten ominaisuuksien varmistamiseksi ennen veden syöttämistä voimalaitosprosessiin. Lisäksi korroosion ehkäisemiseksi höyryturbiin-

nivoimalaitoksen tekniikassa on tärkeää, että valmiin prosessiveden pH-arvo on höyryvoimalan prosessin vaatimalla tasolla.

Ghanan, Namibian ja Kenian lisäksi suuressa osaa Afrikkaa puhtaasta vedestä on todellinen pula. Tämän vuoksi työssä on noteerattu myös erilaisia jo käytössä olevia sekä vasta kehitteillä olevia vedenpuhdistustekniikoita. Vedenpuhdistusteknologian kehittyessä paras ja toimivin ratkaisu Afrikan vedenpuhdistusongelmiin saattaa olla vasta tekeillä, joten on erityisen tärkeää, että teknologian kehityksessä pysytään mukana, eikä käytetä vanhoja puhdistusmenetelmiä vain tavan vuoksi. Esimerkiksi yksinkertaiseksi sekä energia- ja kustannustehokkaaksi merivesien puhdistustavaksi saattaa tulevaisuudessa nousta biopolymeeripohjaiset vedenpuhdistusmateriaalit. Lisäksi uskon, että tulevaisuudessa nanoteknologiaa hyödynnetään vedenpuhdistuksessa yhä enemmän, ehkä tuoden vaihtoehtoja energiaa vievälle käänteisosmoosille. Mielenkiintoista on myös nähdä, milloin biomimeettisten kalvojen kehityksessä päästään täyden mittakaavan puhdistusprosesseihin.

LÄHTEET

A 683/2017. Asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista annetun sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen muuttamisesta. Sosiaali- ja terveysministeriö. Finlex. Viitattu 4.10.2017. www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170683#Pidp450817856

Abiye, T. & Shaduka, I. 2016. Radioactive Seepage through Groundwater Flow from the Uranium Mines, Namibia. MDPI Ag. Hydrology 4, 1. Viitattu 5.4.2017. www.mdpi.com/2306-5338/4/1/11/htm

Ahorsu, K., Esseku, Y. 2017. Emerging security challenges to Africa: The case of haphazard disposal of pharmaceuticals in Ghana. Journal of Human Security, 13, 1, 5-15.

Berwick, J. 2016. Water shortages threaten Namibia's Economy. Life As A Human. Viitattu 28.3.2017. <http://lifeasahuman.com/2016/eco/environment/water-shortages-threaten-namibias-economy/>

Binnie, C. & Kimber, M. 2013. Basic water treatment. Viides painos. Lontoo. ICE Publishing.

Biological nutrient removal. 2010. VITO. Viitattu 2.12.2017. <https://emis.vito.be/en/techniekfiche/biological-nutrient-removal?language=en>

Cryptosporidium. 2015. Terveystieteiden ja hyvinvoinnin laitos. Viitattu 8.11.2017. www.thl.fi/fi/web/infektiotaudit/audit-ja-mikrobit/muut-taudinaiheuttajat/cryptosporidium

Ecla. 2012. Ecla Water Finland. Viitattu 16.11.2017. http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/kaivosvesiverkosto/esitelmat/EcLa_Water_marketing_match_making_2017.pdf

Egbi, C., Akiti, T., Osae, S., Dampare, S., Abass, G. & Adomako, D. 2013. Assessment of groundwater quality by unsaturated zone study due to migration of leachate from Abloradjei waste disposal site, Ghana. Julkaistu sivustolla Springerlink.com vuonna 2015. Viitattu 17.4.2017

Electrocoagulation. 2017. World of Chemicals. Viitattu 3.12.2017. www.worldofchemicals.com/18/chemistry-articles/electrocoagulation-new-technology-for-the-wastewater-treatment.html

Elintarvikkeet. 2016. Usein kysyttyä nitraatista ja nitriitistä. Elintarviketurvallisuusvirasto Evira. Viitattu 3.12.2017. www.evira.fi/elintarvikkeet/tietoa-elintarvikkeista/koostumus/elintarvikeparanteet/lisaaineet/tietoa-yksittaisista-aineista/nitraatti/usein-kysyttya-nitraatista-ja-nitriitista/

Gampson, E., Nartey, V., Golow, A. & Akiti, T. 2013. Hydrochemical study of water collected at a section of the Lower Volta River (Akuse to Sogakope area), Ghana. Julkaistu sivustolla Springerlink.com vuonna 2013. Viitattu 17.4.2017.

Ghana. 2012. Multiple indicator cluster survey. Ghana Statistical Service. Viitattu 26.3.2017. www.unicef.org/ghana/Ghana_MICS_Final.pdf

Ghana. 2016. Aquastat. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Viitattu 25.11.2017. www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/Profile_segments/GHA-WU_eng.stm

Ghana. 2017. Water.org. Viitattu 26.03.2017. <http://water.org/country/ghana/>

Ghana. N.d. Wateraid. Viitattu 28.3.2017. www.wateraid.org/uk/where-we-work/page/ghana

Globalis. 2015. Ghana. YK-liitto. Viitattu 26.3.2017. www.globalis.fi/Maat/Ghana

Globalis. 2015. Namibia. YK-liitto. Viitattu 28.3.2017. www.globalis.fi/Maat/Namibia

Guidelines for drinking water quality. 2017. World Health Organization. 4. painos. Viitattu 5.5.2017. <http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/254637/1/9789241549950-eng.pdf?ua=1>

Hamutoko, J., Mapani, B., Ellmies, R., Bittner, A. & Kuells, C. 2014. A fingerprinting method for the identification of uranium sources in alluvial aquifers: An example from the Khan and Swakop Rivers, Namibia. Viitattu 5.4.2017.

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. 2. tarkistettu painos. Helsinki. Opetushallitus.

Hydrogeology of Kenya. 2017. Earthwise. British Geological Survey. Viitattu 2.9.2017. http://earthwise.bgs.ac.uk/index.php/Hydrogeology_of_Kenya

Hydrological map of Ghana. N.d. ResearchGate GmbH. Viitattu 5.4.2017. www.researchgate.net/figure/304592560_fig2_Figure-3-Hydrological-map-of-Ghana

Kenia. 2006. Kenya National Water Development Report. World Water Assessment Programme. Viitattu 3.9.2017. <http://unesdoc.unesco.org/images/0014/001488/148866E.pdf>

Kenia. 2016. Aquastat. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Viitattu 24.9.2017. www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/Profile_segments/KEN-WU_eng.stm

Kenia. 2017. WASHwatch.org. Viitattu 16.9.2017. www.washwatch.org/en/countries/kenya/summary/statistics/

Lah, K. 2011. Effects of pesticides on human health. Toxipedia. Viitattu 27.11.2017. www.toxipedia.org/display/toxipedia/Effects+of+Pesticides+on+Human+Health

Location map of Ghana. 2017. One World Nations Online. Viitattu 26.3.2017. www.nationsonline.org/oneworld/ghana.htm

Location map of Kenya. 2017. One World Nations Online. Viitattu 15.8.2017. www.nationsonline.org/oneworld/kenya.htm

Location map of Namibia. 2017. One World Nations Online. Viitattu 26.3.2017. www.nationsonline.org/oneworld/namibia.htm

Looking at sachet water consumption in Ghana. 2013. Phys.org. Viitattu 26.3.2017. <https://phys.org/news/2013-06-sachet-consumption-ghana.html>

Mangaani on terveystriski juomavedessä. 2013. Terveystien ja hyvinvoinnin laitos. Viitattu 23.11.2017. www.thl.fi/fi/-/mangaani-on-terveystriski-juomavedessa

Namibia. 2005. Aquastat. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Viitattu 5.4.2017. www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/nam/index.stm

Namibia. 2017. Joint monitoring programme for water supply, sanitation and hygiene. Estimates the water, sanitation and hygiene in Namibia. World Health Organization ja UNICEF. Viitattu 28.3.2017. <https://washdata.org/data#!/nam>

Newater. 2017. Public Utilities Board. Singapore's National Water Agency. Viitattu 3.12.2017. www.pub.gov.sg/watersupply/fournationaltaps/newater

Pearce, G. 2017. Biomimetic membranes: Taking on energy usage in water purification. Waterworld.com. Viitattu 3.12.2017. www.waterworld.com/articles/wwi/print/volume-27/issue-3/editorial-focus/desalination/biomimetic-membranes-taking.html

Perry, M., Madsen, S., Jørgensen, T., Braekevelt, S., Lauritzen, K. & Hélix-Nielsen, C. 2015. Challenges in Commercializing Biomimetic Membranes. Viitattu 3.12.2017. www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4704006/

- Roy, A. & Bhattacharya, J. 2015. Nanotechnology in industrial wastewater treatment. Lontoo. IWA Publishing.
- Runsten, K. 2013. Suoraan hanasta: täysin puhdistettua jätevettä. Maaseudun Tulevaisuus 7.11.2013. Viitattu 25.11.2017. www.maaseuduntulevaisuus.fi/ymparisto/suoraan-hanasta-täysin-puhdistettua-jätevettä-1.50584
- Suhonen, E. 2017. Flotaatio-suodatuksen tehostaminen pintavesilaitoksella. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 28.11.2017. <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/25068/Suhonen.pdf?sequence=3&isA>
- Talousvesi. 2016. Valvira, sosiaali- ja terveystieteiden lupa- ja valvontavirasto. Viitattu 23.10.2017. www.valvira.fi/ymparistoterveys/terveydensuojelu/talousvesi
- Tekpor, M., Akrong, M., Asmah, M., Banu, R. & Ansa, E. 2015. Bacteriological quality of drinking water in the Atebubu-Amantin District of the Brong-Ahafo Region of Ghana. Julkaistu sivustolla Springerlink.com vuonna 2016. Viitattu 17.4.2017.
- The Water Act. 2002. The Water Act No. 8 of 2002. Parliament of Kenya. Viitattu 20.8.2017. www.kenyalaw.org/lex/rest/db/kenyalex/Kenya/Legislation/English/Amendment%20Acts/No.%208%20of%202002.pdf
- The World Factbook. 2017. Central Intelligence Agency. Viitattu 5.4.2017. www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/gh.html
- Urban water supply. 2007. Water Sector Restructuring Secretariat. Viitattu 8.9.2017. https://web.archive.org/web/20070403154006/http://www.waterforghana.org:80/urban_water.asp
- Uutiset. 2017. Farmasian laitokselta uutta yritystoimintaa Tekesin rahoituksella. Itä-Suomen Yliopisto. Viitattu 3.12.2017. www.uef.fi/-/farmasian-laitokselta-uutta-yritystoimintaa-tekesin-rahoituksella
- Volatile organic compounds. 2017. Toxtown. U.S. National Library of Medicine. Viitattu 18.11.2017. https://toxtown.nlm.nih.gov/text_version/chemicals.php?id=31
- Water and sanitation profile. 2007. United States Agency for International Development. Viitattu 5.9.2017. http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/Pnado931.pdf
- Water consumption in Africa. 2005. Institute Water for Africa. Viitattu 24.11.2017. www.water-for-africa.org/en/water-consumption/articles/water-consumption-in-africa.html

Water facts. 2017. Borealis Ag. Viitattu 24.8.2017. <http://waterfortheworld.net/index.php?id=12>

Water for life. 2010. Ghana National Commission for UNESCO. Viitattu 5.4.2017. www.natcomreport.com/ghana/livre/water.pdf

Windhoek. N.d. Puhdistusprosessin kuvaus. Viitattu 4.11.2017. www.wabag.com/wabag-projects/windhoek-goreangab-water-reclamation-plant/